

# 用改进的遗传算法从 $S$ 参数中提取 HBT 交流小信号等效电路模型参数<sup>\*</sup>

石瑞英<sup>1,2,3</sup> 刘训春<sup>2</sup> 钱永学<sup>2,3</sup> 石华芬<sup>2,3</sup>

(1 四川大学物理系, 成都 610064)

(2 中国科学院微电子中心, 北京 100029)

(3 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要:** 将遗传算法用于 HBT 等效电路模型参数的提取并对其进行改进, 改进后的遗传算法自动优化遗传、杂交和变异算子, 节省了寻找最佳遗传、杂交和变异概率的时间并提高了提取参数的速度. 在 1~26.5GHz 频率范围内, 用改进的遗传算法提取了 Ga<sub>0.49</sub>In<sub>0.51</sub>P/GaAs HBT 交流小信号等效电路模型的全部 16 个参数, 得到了令人满意的模拟与测量  $S$  参数的比较结果.

**关键词:** 改进的全局优化遗传算法; 小信号等效电路; 参数提取

EEACC: 1350F; 0260; 2560B; 2560J

中图分类号: TN303; TN385

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2002)09-0957-05

## 1 引言

由于异质结双极型晶体管(HBT)具有优越的高频、高速和高电流驱动能力, 使得它在数字、模拟电路和功率放大器中有着极大的应用潜力. 一方面, 建立精确的器件模型, 准确、快速获得模型参数是电路设计成功的基本保障. 另一方面, 由于小信号等效电路模型参数与器件的物理机理和工艺过程密切相关, 获得小信号等效电路模型参数可以起到验证电路设计、优化工艺流程的作用. 目前, 提取模型参数的方法主要有直接提取法<sup>[1]</sup>和数值优化法<sup>[2]</sup>两类. 直接提取法可以得到唯一的、确定的解, 但它需要特殊的测试结构, 其精度受测量精度的影响. 由于直接提取方法所用的频率点较少, 往往不能保证在全部频率范围内器件等效电路模型参数的一致性; 数值优化法受测量误差的影响较小, 可以得到比直接提取法更为准确的参数值, 但目前发表的优化方法大部分采用的是局部优化法, 其收敛速度和得到的解

依赖于初始值的选取, 而且不能保证一定收敛, 有时还会得到不符合实际或与真实值相差较大的错误解. 克服这个问题的一种方法是增加额外的测量去计算器件的寄生参数, 把寄生参数的影响从本征参数的影响中分离出来, 从  $S$  参数中只提取器件的本征参数<sup>[3]</sup>, 这样可以兼顾两种方法的优点. 但是, 额外的测量不仅费时, 而且增加了费用, 这促使人们去尝试用全局优化的算法来提取器件的模型参数.

模拟退火算法和遗传算法均为全局优化算法<sup>[4]</sup>. 最近陈俊等人已经把模拟退火算法成功应用于 HFET 小信号等效电路模型参数的提取<sup>[5]</sup>, 谢晓锋等人用遗传算法实现了与 MOS 器件综合<sup>[6]</sup>. 本文在尝试用遗传算法从  $S$  参数中提取 InGaP/GaAs HBT 交流小信号等效电路模型参数的过程中, 发现不同的群体个数及把算法应用于求解不同的问题时, 其最佳遗传、杂交和变异概率不同, 这需要经过多次试验来确定. 为此我们对遗传算法进行了改进, 改进后的遗传算法可以自动优化遗传、杂交和变异概率, 这样省去了寻找最佳的遗传、杂交和变异概率

\* 国家 973 计划资助项目(项目编号:G200006830403)

石瑞英 女, 副教授, 博士研究生, 目前主要从事化合物半导体器件和微波单片集成电路等方面的研究.

刘训春 男, 博士生导师, 研究兴趣是半导体器件与电路以及微细加工.

2001-12-26 收到, 2002-04-04 定稿

©2002 中国电子学会

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

的时间.

在 1~26.5GHz 的频率范围内用改进的遗传算法提取了 InGaP/GaAs HBT 交流小信号等效电路模型的全部 16 个参数. 在所提取参数的频率范围内,  $S$  参数的计算结果与测试结果吻合得很好. 在用改进的遗传算法提取参数时不需要给出确定的初始值, 只需根据经验或理论分析给出参数有物理意义的搜索范围即可, 克服了其它局部优化法提取结果和优化速度受初始值限制的缺点, 同时也避免了优化到非物理解的可能性.

## 2 HBT 小信号等效电路模型

HBT 混合  $\pi$  型小信号等效电路如图 1 所示<sup>[7]</sup>, 此等效电路模型可分为本征和寄生两部分. 本征参数包括二极管的动态电阻  $R_{be}$ 、基区-发射区电容  $C_{be}$  (基区-发射区结电容+基区电荷电容)、本征基区-收集区结电容  $C_{jci}$ 、延迟时间  $\tau$  跨导  $g_m$  ( $g_m = g_m^0 \exp(-j\omega\tau)$ ). 寄生参数为: 与压点及器件连接相关的寄生电容 ( $C_{pbe}$ ,  $C_{pbc}$ ,  $C_{pcc}$ ) 和电感 ( $L_B$ ,  $L_C$ ,  $L_E$ )、外基区-集电区结电容  $C_{jcx}$ 、发射区、集电区及基区串联电阻  $R_E$ ,  $R_C$  和  $R_B$ 、基区扩散电阻  $R_{bb}$ .

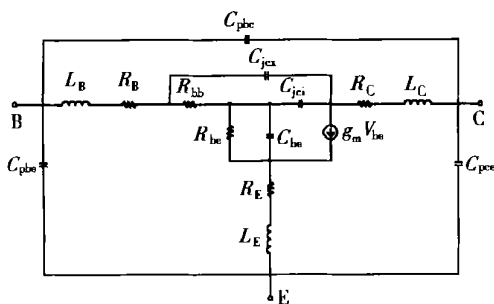


图 1 HBT 混合  $\pi$  型小信号等效电路图

Fig. 1 HBT small-signal hybrid- $\pi$  model

基于上述模型,  $S$  参数的计算如下:

(1) 计算本征晶体管的  $Y$  参数:

$$Y_{i11} = \frac{1}{R_{be}} + j\omega(C_{jci} + C_{be}), \quad Y_{i12} = -j\omega C_{jci},$$

$$Y_{21} = g_m - j\omega C_{jci}, \quad Y_{22} = j\omega C_{jci}$$

其中  $g_m = g_m^0 \exp(-j\omega\tau)$

(2)  $Y$  参数转化为  $Z$  参数, 计算  $R_{bb}$  的贡献;

(3)  $Z$  参数转化为  $Y$  参数, 计算  $C_{jcx}$  的贡献;

(4)  $Y$  参数转化为  $Z$  参数, 计算寄生参数  $L_E$ 、

$L_B$ ,  $L_C$ ,  $R_E$ ,  $R_B$  和  $R_C$  的贡献;

(5)  $Z$  参数转化为  $Y$  参数, 计算寄生参数  $C_{pbe}$ 、 $C_{pbc}$  和  $C_{pcc}$  的贡献;

(6)  $Y$  参数转化为  $S$  参数.

提取参数就是通过某种优化方法使模拟计算与测量的  $S$  参数拟合, 其拟合程度可以用目标函数  $Y_{opt}$  表示:

$$Y_{opt} = \sum_{\text{所有频率点}} \left[ \left| \frac{S_{11m} - S_{11s}}{S_{11m}} \right|^2 + \left| \frac{S_{12m} - S_{12s}}{S_{12m}} \right|^2 + \left| \frac{S_{21m} - S_{21s}}{S_{21m}} \right|^2 + \left| \frac{S_{22m} - S_{22s}}{S_{22m}} \right|^2 \right]$$

式中  $S_{ijm}$  和  $S_{ijs}$  ( $i, j \in \{1, 2\}$ ) 分别为 HBT 的测量和模型模拟计算的  $S$  参数值. 目标函数越小, 说明提取的参数与实际的偏差也越小.

## 3 参数提取

遗传算法是一种通过模拟自然界进化过程搜索最优解的方法. 其基本思想是利用某种编码技术把特定的问题与二进制串相联系, 然后模拟由这些串组成的群体的进化过程. 它从一个由  $N$  个串组成的初始群体出发, 不断循环地实行复制、杂交和变异过程, 通过有组织地随机信息交换来重新结合那些适应性好的串<sup>[4]</sup>. 经过确定的代数或得到某一可接受的结果后即可停止运算, 停止时最好的个体所对应的结果即是所需要的解.

准备应用遗传算法的第一步是选择表示方案. 在这里我们把所提取的 16 个参数用一个 192 位的二进制编码表示, 其中每个参数与二进制编码中的 12 位相对应. 12 位二进制数有 4096 个可能的取值. 根据理论分析和经验给出每位参数的取值范围, 以保证优化结果收敛于有物理意义的解. 参数所取值的下限与 12 位数编码的 000000000000 相对应, 上限与 12 位编码的 111111111111 相对应, 其它的中间值用余下的 4094 个 12 位编码表示. 从这里我们可以看出, 所提取的参数并不能连续取值. 其最小变化量 = 参数取值上下限之差 / ( $2^n - 1$ ),  $n$  为每个参量所对应串的长度, 在这里  $n$  等于 12. 串的长度与所提参数的上下限直接影响参数的精度. 很显然, 串的长度越长, 参数的上下限相差越小, 其结果越精确. 但是, 过长的串会减慢运算速度, 过小的参数取值范围有可能使真实结果不在取值范围之内. 为了解决这个矛盾, 我们把每位参数固定用一个 12 位数的编码表示, 参数的最小变化量为参数取值上下限

之差/4095, 如果参数上下限相差不是很大的话, 这就表示已经精确到小数点后第四位. 为了进一步提高取值精度, 可以根据初步运算结果, 再把参数取值的范围缩小, 这样即提高了优化精度又可保证所要结果在参数限定的取值范围之内.

准备应用遗传算法的第二步是确定适应值度量, 以检验此种表示方案的好坏程度. 在这里适应值  $G=C-Y_{opt}$ , 其中  $C$  为常数. 目标函数越小, 说明计算与测量的偏差越小, 那么它的适应性也就越好, 其适应值也就越高. 目标函数与适应值具有等效性, 所以我们在提取参数时直接用目标函数表示其适应值.

准备应用遗传算法的第三步是确定控制算法的参数和变量. 最重要的两个参数和变量是群体规模  $N$  和最大代数  $M$ . 在这里我们选择群体规模为 60, 最大代数目不作限定, 当满足停止的准则时, 算法就停止运算.

准备应用遗传算法的第四步是确定执行停止的准则和指定结果的方法. 在这里当目标函数达到要求时停止算法的执行并指定执行中得到的最好的结果作为算法的结果.

一旦完成这四个准备步骤, 遗传算法就按照不依赖于问题本身的方式去求解问题. 应用遗传算法提取参数的方框图如图 2 所示.

在传统的遗传算法中, 遗传和杂交算子起主要作用, 变异算子是次要算子, 只以很小的概率进行变异. 遗传、杂交和变异概率之和为 1. 在每一代向下一代进化过程中, 遗传、杂交和变异概率始终保持不变. 在遗传算法执行的过程中, 遗传、杂交和变异算子的选取直接影响算法的执行速度和结果的收敛性. 不同的群体个数及把算法应用于求解不同的问题时, 其最佳的遗传、杂交和变异概率不同<sup>[4]</sup>, 这需要经过多次试验来确定. 而找到这个最佳值也需要花费一定的时间, 尤其对于新手更是如此. 为了节省寻找最佳的遗传、杂交和变异概率的时间以提高算法在提取参数时的运行速度, 我们对遗传算法进行了改进. 在算法执行时增加一个过渡群体, 在这里选择这个过渡群体有  $3N$  个个体, 它包括由父代群体中复制得到的  $N$  个个体, 由杂交算子作用于父代群体得到的  $N$  个个体和对这个父代群体中的每个串执行变异运算得到的  $N$  个个体. 在这里我们用了一点和两点两种杂交算子以确保好的模式能够尽量保留下来, 高变异率的选取以保持群体的多样性. 从这

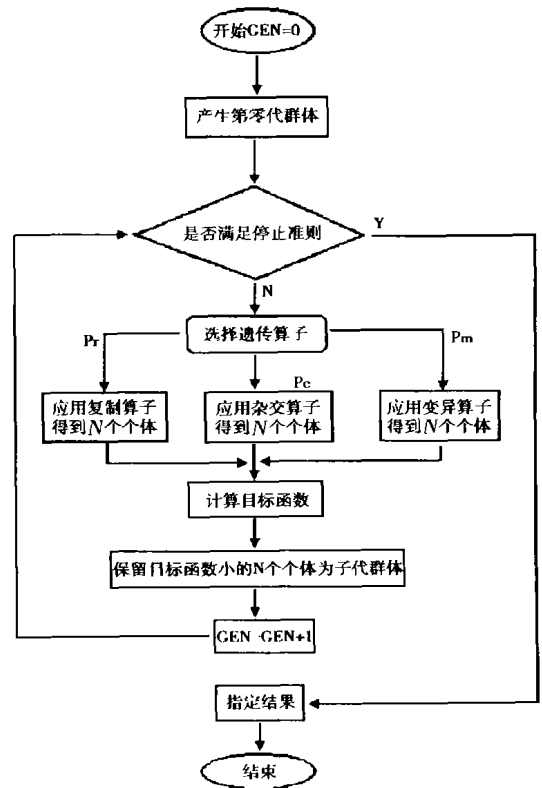


图 2 遗传算法提取 HBT 模型参数框图

Fig. 2 Flowchart for extracting parameters HBT of using genetic algorithm

个过渡群体的  $3N$  个串中选择  $N$  适应值好的也就是目标函数小的个体为子代群体. 与传统的遗传算法不同的是遗传、杂交和变异概率并不是我们事先确定好了的, 在进化过程中也不是始终保持不变的. 从  $N$  个父代个体到  $N$  个子代个体的进化过程中, 我们并不需要知道有多少个个体是由遗传得到, 多少个个体来自于杂交和变异(当然我们是可以通过计算机统计出来, 但没有必要这样做), 而是根据遗传、杂交和变异概率之和为 1, 在算法执行的过程中自动优化遗传、杂交和变异概率. 这样就可以省去寻找最佳的遗传、杂交和变异概率的时间. 由于从过渡群体到子代群体的进化过程中引进了优胜劣汰机制, 使子代群体有更强的适应性和更快的进化速度, 因此也提高了参数提取的速度. 用改进的遗传算法提取参数时, 只须经过四五十代的运算即可得到满意的结果. 实践证明, 它是一种简单、有效、快速地提取参数的方法.

## 4 结果

我们用 HP-8510 网络分析仪测量了 GaInP/

GaAs HBT 1~26.5GHz 的  $S$  参数. 用遗传算法在 1~26.5GHz 的频率范围内从  $S$  参数中提取的小信号等效电路模型参数的结果列于表 1. 实验证明, 用改进后的遗传算法提取参数只须经过四五十代的运算即可得到满意的结果. 为了检验算法所提取参数值的准确度, 我们进行了多次提取参数的实验, 发现其结果的一致性很好. 用表 1 的参数值计算得到的  $S$  参数与测量的  $S$  参数的比较结果如图 3 所示. 从图 3 可以看出两者吻合得很好. 这不仅验证了改进的遗传算法的正确性, 而且也说明用它提取参数是切实可行的, 同时我们也发现用此种方法提取参数的速度很快.

表 1 从  $S$  参数中提取的交流小信号等效电路模型参数值

Table 1 Extracting parameters values of small signal equivalent model from  $S$  parameters

参数	参数值	参数	参数值
$R_{be}/\Omega$	14.9608	$C_{jei}/\text{pF}$	0.010157
$C_{be}/\text{pF}$	0.15294	$C_{jex}/\text{pF}$	0.015176
$g_{m0}/\text{S}$	1.4804	$L_E/\text{nH}$	0.036961
$\tau_{ps}$	6.0000	$L_B/\text{nH}$	0.010412
$R_{bb}/\Omega$	50.8627	$L_C/\text{nH}$	0.020235
$R_E/\Omega$	13.0824	$C_{pbc}/\text{pF}$	0.000100
$R_B/\Omega$	5.6682	$C_{pbc}/\text{pF}$	0.0084067
$R_C/\Omega$	64.7373	$C_{pcc}/\text{pF}$	0.0081275

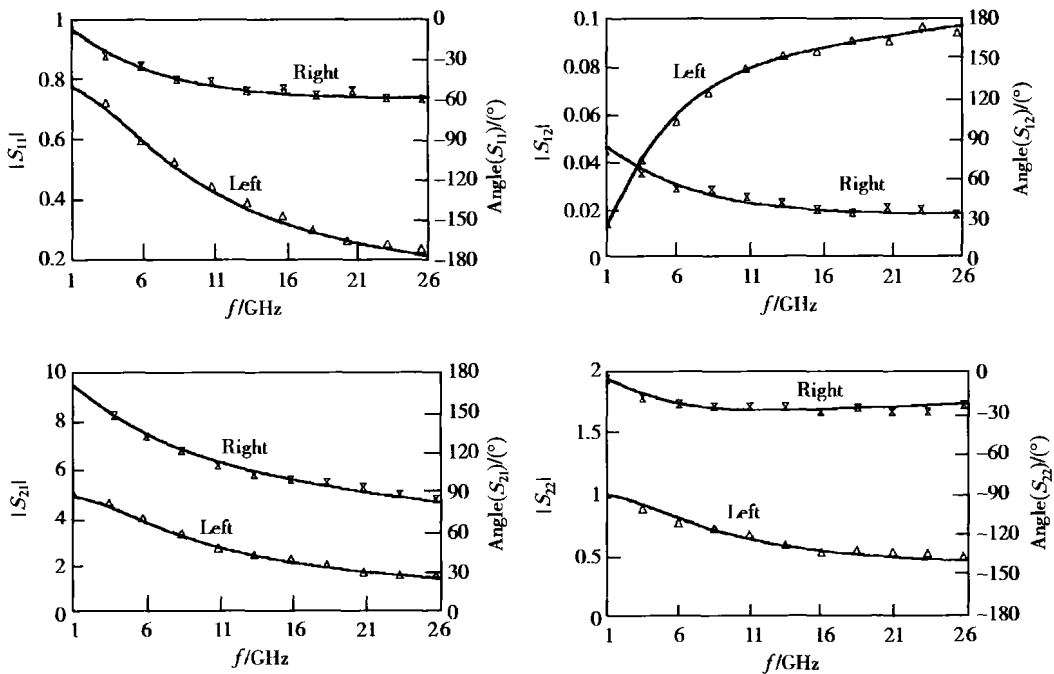


图 3 计算与测量的  $S$  参数比较(符号为测量值, 曲线表示计算结果)

Fig. 3 Comparison between calculated (curves) and measured (symbols)  $S$  parameters

## 5 结论

本文对遗传算法进行了改进并成功地用其从  $S$  参数中提取了 InGaP/GaAs HBT 混合  $\pi$  型小信号等效电路模型的 16 个参数, 计算和测量的  $S$  参数吻合得很好. 改进后的遗传算法自动优化遗传、杂交和变异概率, 这不仅节省了寻找最佳遗传、杂交和变异概率的时间, 而且提高了参数提取的速度. 由于改进的遗传算法是全局优化算法, 而且参数的取值限定

在有物理意义的范围内, 所以得到的解不依赖于初值的选取并且避免了收敛于错误解的可能性. 实验证明, 改进的遗传算法是一种简单、快速、有效地提取 HBT 等效电路模型参数的方法. 另外, 改进的遗传算法可移植性很好, 仅需很小的改动即可用于 HEMT、MESFET 等其它微波器件小信号等效电路模型参数的提取. 同样也可提取上述器件的大信号等效模型参数. 我们不仅找到了一种简单、有效、快速地提取参数的方法, 而且也拓宽了遗传算法的应用范围.

## 参考文献

- [ 1 ] Costa D, Liu W U, Harris J S, et al. Direct extraction of the AlGaAs/GaAs heterojunction bipolar transistor small-signal equivalent circuit. *IEEE Trans Electron Devices*, 1991, 38( 9 ): 2018
- [ 2 ] Ghaddab H, Ghannouchi F M, Choubani F, et al. Small-signal modeling of HBT's using a hybrid optimization/statistical technique. *IEEE Trans Microw Theory Tech*, 1998, 46( 3 ): 292
- [ 3 ] Lin Bin, Yang Liwu, Wang S C. A semi-analytical parameter-extraction procedure for HBT equivalent circuit. *IEEE Trans Microw Theory Tech*, 1998, 46( 10 ): 1427
- [ 4 ] Tang Lishan, Chen Yuping. Non-numerical value concurrent algorithm ( volume 2 ) -- genetic algorithm. Beijing: Science Press, 2000 ( in Chinese ) [ 唐立山, 陈毓屏. 非数值并行算法 ( 第二册 ) -- 遗传算法. 北京: 科学出版社, 2000 年 ]
- [ 5 ] Chen Jun, Liu Xunchun. HFET small signal model extraction from S parameters using simulated annealing algorithm. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2001, 22: 79 ( in Chinese ) [ 陈俊, 刘训春. 用模拟退火算法从 S 参数提取 HFET 小信号等效电路模型参数. 半导体学报, 2001, 22: 79 ]
- [ 6 ] Xie Xiaofeng, Li Zhao, Ruan Jun, et al. Realization of device synthesis using genetic algorithms. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2002, 23: 95 ( in Chinese ) [ 谢小锋, 李钊, 阮骏, 等. 应用遗传算法实现 MOS 器件综合. 半导体学报, 2002, 23: 95 ]
- [ 7 ] Bousnina S, Ghannouchi F M, Surridge R. A novel extraction method for equivalent circuit parameters of HBT small-signal hybrid- $\Pi$  model. In: *GaAs 2000 Conference Proceedings*. 2nd-3rd, Paris, 2000

## Ga<sub>0.49</sub>In<sub>0.51</sub>P/GaAs HBT Small-Signal Model Extraction Using a Improved Genetic Algorithm<sup>\*</sup>

Shi Ruiying<sup>1,2,3</sup>, Liu Xunchun<sup>2</sup>, Qian Yongxue<sup>2,3</sup> and Shi Huaifen<sup>2,3</sup>

(<sup>1</sup> Department of Physics, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

(<sup>2</sup> Microelectronics R & D Center, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

(<sup>3</sup> Graduate School of The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract:** An improved global optimum genetic algorithm are described, reproduction, crossover and mutation operators are automatically optimized in the algorithm. The time searching the best of all reproduction, crossover and mutation operators is saved and the speed of parameter extraction is quickened. All 16 parameters of the Ga<sub>0.49</sub>In<sub>0.51</sub>P/GaAs hetero-junction bipolar transistor (HBT) small signal equivalent circuit model are extracted from S parameters in the range of 1~26.5GHz. Excellent agreement between the modeled and measured device performance is achieved in a wide range of operating conditions.

**Key words:** an improved genetic algorithm; small signal equivalent circuit model; parameter extraction

**EEACC:** 1350F; 0260; 2560B; 2560J

**Article ID:** 0253-4177(2002)09-0957-05

\* Project supported by the National 973 Project( No. G200006830403)

Shi Ruiying female, was born in 1963, associate professor, PhD candidate. Her research interests are compound semiconductor device and MMICs.

Liu Xunchun male, was born in 1943, professor. His research interests are compound semiconductor device and high density plasma etching technology.

Received 26 December 2001, revised manuscript received 4 April 2002

©2002 The Chinese Institute of Electronics

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>